

氷盤と構造物の接触率に注目した氷盤非同時的破壊時の 構造物に作用する全氷力の評価

竹内 貴弘*・佐伯 浩**

1. 緒 言

構造物を氷海域に建設する場合、氷盤の移動と破壊に伴って構造物に作用する全氷力の正確な算定が必要となる。従来の小規模貫入試験に基づく全氷力の評価を、北極海向けの大型構造物（幅 100 m 程度）に直接適用すると、過大評価になることが現地観測結果から指摘されている。前報では、構造物が大型化すると構造物前面の氷盤は各独立領域で非同時的に破壊するため氷圧力は低減し、これは、氷盤先端部と構造物の接触状態が不規則になることが要因であること、を示した (Takeuchi et al., 1992 a)。本研究では、初めに、独立破壊領域の氷圧力の時系列データの確率特性を調べ、これを再現することを目的とする。これは、氷盤の破壊現象が確率的であること、実氷盤の強度はバラツキが大きいこと、による。ここでは、降雨の流量予測に適用された Shot Noise Model (Weiss, 1977) の、氷圧力データへの適用性を検討する。次に、再現されたデータを重ね合わせて、非同時破壊時の全氷力の定量評価に必要な構造物と氷盤の接触率及び貫入試験が出来ない大型構造物に作用する全氷力を推定することを目的とする。

2. SHOT NOISE MODEL

降雨に伴う時間単位の短い流量時系列を再現するために適用されている Shot Noise Model (SNM) を用いて、氷圧力の時系列データの再現性を検討する。これは、フィールド氷盤貫入試験において、杭前面に取り付けた圧力センサーにより得られた氷盤の独立破壊領域が構造物に伝達する氷圧力データは、急激な上昇・下降を表す間欠的なピークを示し、上記の流量時系列データと類似していること、及び Kry (1978) の用いた対数正規分布の仮定には従わず、新たな手法が要求されていること、による。

(SNM) は、以下の式で表される。

$$X(t) = \sum_{m=N(-\infty)}^{N(+\infty)} y_m \cdot \exp\{-b(t - \tau_m)\} \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $N(t)$ は、事象発生率 ν のポアソン過程、 y_m は時刻 τ_m における降雨量（氷圧力）に相当し平均 θ の指数分布に従う変数、 b は低減係数、 τ_m は降雨の事象の生起時刻である。また、この式により発生される $X(t)$ は、 Γ 分布に従うことが知られており、この過程のパラメータと $X(t)$ の積率の関係は、 ν , θ , b の値により推定可能となる。この時系列発生方法を局部氷圧力の場合に適用し、実験データとの比較を行った。 Γ 分布は、以下の様与えられる。 $f(X)$ は、確率密度関数である。

$$f(X) = \{1/\Gamma(a)\} * (1/\theta)^a * X^{a-1} * \exp(-X/\theta) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、

$$a = \nu/b \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\text{平均値 } \mu = \theta * a \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\text{分散 } \sigma^2 = \theta^2 * a \quad \cdots \cdots (5)$$

$$\text{相関係数 } \rho[X(t), X(t+s)] = \exp(-b * s) \quad \cdots \cdots (6)$$

$$\text{ひずみ係数 } \beta_1 = 2 * (1/a)^{0.5} \quad \cdots \cdots (7)$$

$$\text{とがり係数 } \beta_2 = 6 * (1/a) + 3 \quad \cdots \cdots (8)$$

シミュレーションのための基本式は、(1) から次の式で与えられる。

$$X(t+1) = e^{-b} * X(t) + \sum_{m=N(t)}^{N(t+1)} y_m \cdot \exp\{-b(t+1 - \tau_m)\} \quad \cdots \cdots (9)$$

上式に基づき、各独立破壊領域の氷圧力データの時系列を独立破壊領域の数 (n) { = 貫入面積 AREA (= 構造物幅 * 氷厚) / 独立破壊領域の面積 } だけ発生させ、これらを重ね合わせることににより、構造物と氷盤の接触数と全氷力を推定する。

3. 実験データと模擬データの比較

3.1 氷圧力の時系列データ

氷圧力の実験データから ν , θ , b の値を式 (3), (4), (5), (6) より推定し (表-1), 式 (9) にしたがって模擬データを発生させ、一軸圧縮強度で無次元化すると図-1 の様になる。この表の ν , θ , b は、9 センサーから得られた値の平均である。間欠的なピークがランダムな時間に発生する時系列となり、実験データの例 (図-2) に類似している。それぞれ、横軸は 1024 点をとって

* 正会員 工博 清水建設(株)技術研究所 寒地基礎 G

** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

る。ここで、実験データは、貫入杭の幅 $W=100\text{ cm}$ 、氷厚 $h=6.5\sim7\text{ cm}$ 、杭の貫入に伴う氷盤の歪速度 $\dot{\epsilon}=10^{-3}\text{ (s}^{-1}\text{)}$ のオーダー、一軸圧縮強度 $4.88\sim6.85\text{ (MPa)}$ の条件下において、氷厚中心線上に位置する様に杭全面に 10 cm 間隔 (1 実験で 9 センサー) で取り付けた圧力センサーの測定値である (Takeuchi et al., 1992a; 竹内ら, 1992b)。また、氷盤の独立破壊領域の面積 (A_f) は、0.

007 m^2 であった。実験データの確率分布への適合性を調べたところ、センサーの位置によってデータにバラツキがあり、最適な分布を決定することが困難であった。そこで、実験データから一軸圧縮強度よりも大きいデータを取り出し、確率特性を調べた。これは、実験データが間欠的なピークを示し、このピークの部分が氷力へ貢献すること、及びピーク以外の部分の値は小さいためである。

3.2 構造物と氷盤の接触数

初めに、独立破壊領域の数 (n) の時系列に関して、一軸圧縮強度より大きい値を与える時系列の数を (n_c) とする。この (n_c) に関して、以下の式で示されるポアソン分布への適合性を検討する。 $f_{pp}(n_c)$ は確率密度関数、 $f_{pc}(n_c)$ は分布関数である。

$$f_{pp}(n_c) = [(m)^{n_c}/n_c!] * \exp(-m) \dots\dots\dots (10)$$
$$(n_c = 0, 1, 2, \dots, n)$$

$$f_{pc}(n_c) = \sum_{n_c=0}^n [(m)^{n_c}/n_c!] * \exp(-m) \dots\dots\dots (11)$$

(m) は全データ数 1024 点に対する (n_c) の平均である。また、(n_c) の最大値を (n_m) とし、($n=9$) の時の実験データと Shot Noise Data (SND) の結果を表-2 に示す。結果の例を図-3、図-4 に示す。 χ^2 -検定では、危険率 0.05 かつ実測度数 10 の場合 $\chi_0^2=16.92$ となり、表-2 から $\chi^2 < \chi_0^2$ を満たすために、接触数 (n_c) は以下のポアソ

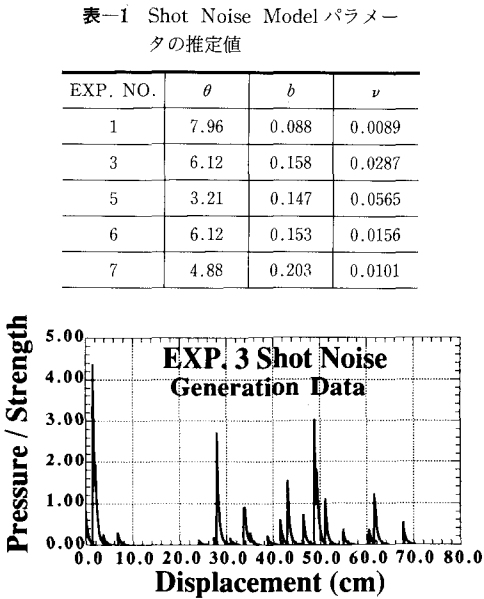


図-1 Shot Noise Model による模擬データ

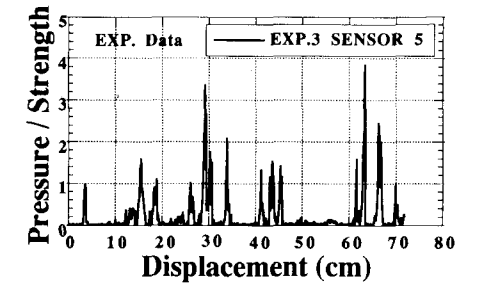


図-2 氷圧力実験データの例 (EXP. 3 SENSOR 5)

表-2 実験データと Shot Noise Data による (m), (n_m), (χ^2) の値 (Poisson)

EXP. NO.	EXP. Data			Shot Noise Data		
	m	n_m	χ^2	m	n_m	χ^2
1	0.175	3	1.6	0.298	2	10.9
3	0.338	3	4.5	0.358	3	12.9
5	0.403	3	7.1	0.530	3	16.4
6	0.362	2	6.4	0.425	3	1.7
7	0.340	3	4.6	0.134	1	6.4

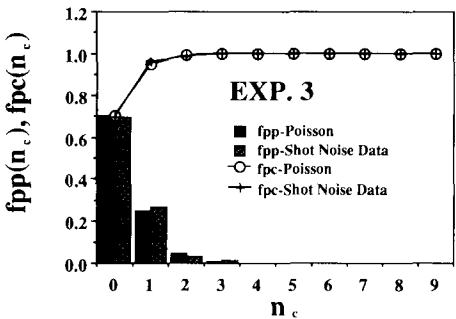


図-3 (n_c) の Poisson 分布への適合性 (SND)

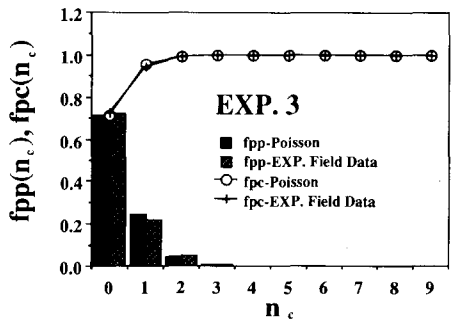


図-4 (n_c) の Poisson 分布への適合性 (実験データ)

表-3 各 (n) に対する P_c の値

EXP. NO.	P_c			
	$n=100$	$n=1000$	$n=10000$	平均値
1	0.029	0.028	0.027	0.028
3	0.040	0.039	0.041	0.040
5	0.058	0.059	0.060	0.059
6	0.035	0.036	0.037	0.036
7	0.011	0.011	0.011	0.011

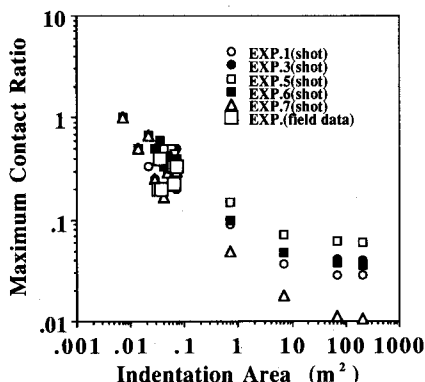


図-5 最大接触率と貫入面積の関係

ン分布で近似できる。即ち、全体 ($n=9$) に対して最大の接触数は3となり、氷盤の破壊は構造物幅全体にわたり同時には発生していないことが分かる。

次に、貫入面積 A (構造物幅 $\times$ 氷厚) が大きい場合を計算する。参考までに構造物幅が 100 m、氷厚 2 m の時、 n は 28572 となるため、 $n=100, 1000, 10000, 30000$ の値を用いて計算する。この n の数だけ時系列を発生し、各時間 (一時系列当り 1024 点) における一軸圧縮強度よりも大きい時系列の数を合計し、この中で全体 1024 点中最大となる値 (n_m) を計算する。 (n) が大きい時は中心極限定理より正規分布で近似できる。 (m) $= n * P_c$ とおき、 $n=100, 1000, 10000$ の時の (m) の計算結果から P_c はほぼ一定値をとり、この時 P_c は表-3 の様になる。よって、平均 ($n * P_c$)、標準偏差 $\sqrt{n * P_c}$ の正規分布に従う乱数を発生させることにより、接触数が計算できる。これらのデータを基に、最大接触率 (= 最大接触面積 / 貫入面積) と貫入面積の関係を計算したものが図-5 となる。ここで、最大接触面積は、最大の接触数 (n_m) $\times$ 独立破壊領域の面積 (A_f) で与えられる。(SND) と現地データは、非常に近い値を示す。また、貫入面積の増大に伴い最大接触率は大幅に低減し、 $A=10 \text{ m}^2$ を超えるとほぼ一定値を示すようになる。

3.3 氷圧力データの確率分布

氷圧力値を一軸圧縮強度で除した値を f として、この

表-4 実験データの Weibull パラメータの推定値

EXP. NO.	γ_1	α_1	M	R	平均
1	1.0	1.01	1.14	0.98	1.91
3	1.0	0.73	0.92	0.98	1.70
5	1.0	0.48	1.19	0.99	1.52
6	1.0	0.86	0.96	0.99	1.88
7	1.0	0.89	0.92	0.97	1.90

表-5 SND の Weibull パラメータの推定値

EXP. NO.	γ_1	α_1	M	R	平均
1	1.0	0.77	0.89	0.99	1.83
3	1.0	0.68	0.94	0.99	1.69
5	1.0	0.53	0.99	0.99	1.53
6	1.0	0.99	0.95	0.99	2.05
7	1.0	0.83	1.06	0.98	1.88

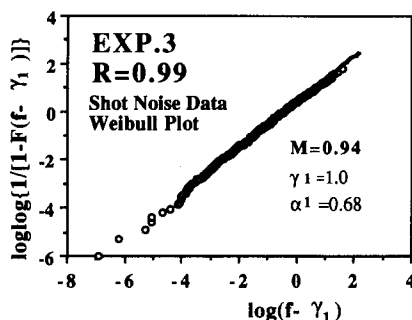


図-6 (f) の Weibull 分布への適合性 (SND)

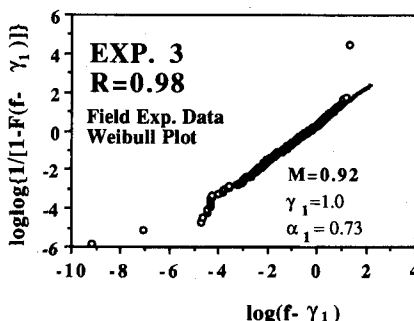


図-7 (f) の Weibull 分布への適合性 (実験データ)

値の以下で示される Weibull 分布への適合性を検討する。 $f_{wp}(f)$ は確率密度関数、 $f_{wc}(f)$ は分布関数である。

$$f_{wp}(f) = (M/\alpha_1) * (f - \gamma_1)^{(M-1)} * \exp[-\{(f - \gamma_1)^M\}/\alpha_1] \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$f_{wc}(f) = 1 - \exp[-\{(f - \gamma_1)^M\}/\alpha_1] \quad \dots\dots\dots (13)$$

計算結果を表-4、表-5 に示す。その相関係数 (R) か

ら, Weibull 分布近似が成立する. M の値が 1 に近いことは, 指数分布に近くなることを示している. また, 水文学の上位標本値の分布が指数分布に従う場合が多いことが知られているが, この氷圧力の場合もこれに近い結果となっている. 計算結果の例 (図-6, 図-7) から明らかな様に, 直線に近く Weibull 分布近似が成立する.

4. 全氷力の推定

上記の確率分布の結果に基づき, 全氷力 (T_f) を次のように計算する. 氷盤と構造物の接触数 {contact no.} は, 正規分布に従う変数とする. $\{f\}$ の値もパラメータ (M, a_1, γ_1) の Weibull 分布に従う変数とする. また, 過去の研究を参考にして, 一軸圧縮強度 $\{\sigma_c\}$ の値も平均 (μ_s), 標準偏差 (σ_s) の正規分布に従う変数とする. 計算に用いたパラメータ $\{\sigma_c\}$ は, サロマ湖の一年海水データ (氷温 $-3, -10^{\circ}\text{C}$) (Takeuchi et al., 1993) 及び多年圧力氷脈 (氷温 $-5, -20^{\circ}\text{C}$) (Cox et al., 1984) データの氷の歪速度が 10^{-3}sec^{-1} の条件下で得られた値 (表-6) を用いた. ここで, 全氷力 (T_f), 貫入氷圧力 (P_f) を確率的に次式で計算した.

$$(T_f) = \{\text{contact no.}\} * \{f\} * \{\sigma_c\} * \{A_f\} \cdots \cdots (14)$$

$$(P_f) = \{T_f/A\} \cdots \cdots (15)$$

計算は, 各実験条件下で, それぞれ $n=10, 100, 500, 1000, 5000, 10000, 30000$ の場合について行った ($A=0.07, 0.7, 3.5, 7, 35, 70, 210\text{ m}^2$). ここで, 乱数を 10000 個発生させ, (T_f) の繰返し計算を行った. 図-8 に, first year ($\sigma_c=4.37\text{ MPa}$) と multi year ($\sigma_c=9.63\text{ MPa}$) の時の, 貫入面積 (A) と貫入氷圧力 (P_f) の関係を示す.

表-6 一軸圧縮強度の平均±標準偏差 (MPa)

一年海水		多年圧力氷脈	
氷温 -3°C	氷温 -10°C	氷温 -5°C	氷温 -20°C
4.37 ± 1.51	5.69 ± 2.31	6.06 ± 1.63	9.63 ± 1.39

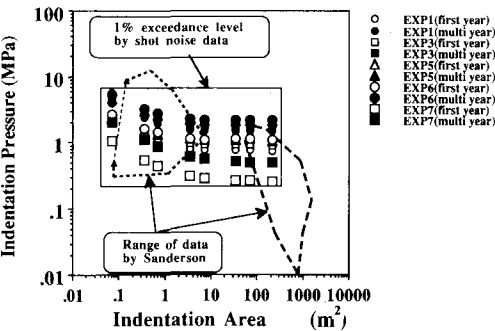


図-8 貫入面積 (A) と貫入氷圧力 (P_f) の関係

ここでは, 計算された (P_f) の小さい方から 9901 番目のデータを 1%超過確率値としてプロットしてある. 貫入面積 (A) の増大に伴い貫入氷圧力 (P_f) が低減し, Ashby et al. (1986) らの結果と同様の傾向を示す. 同時に Sanderson (1988) の Pressure-Area Curve に示された, 現地実測データとの比較を示した. 本計算は, 氷盤と構造物の接触状態に主に注目したために, 貫入面積 (A) の全領域にわたって (P_f) の値を推定することは困難である. このため, 氷厚が変化した場合の独立破壊領域の面積と氷圧力・氷盤強度の体積効果・氷盤強度の位置効果を調べ, 更に貫入氷圧力 (P_f) と貫入面積 (A) の関係を調べる必要がある.

5. 結 論

① Shot Noise Model に基づき, 急激な上昇・下降を示す氷圧力の時系列データをシミュレートした.

② 実験データと Shot Noise Data のしきい値 (一軸圧縮強度) よりも大きい氷圧力値 (実際には一軸圧縮強度に対する倍数値) は, 両データともに Weibull 分布に適合した.

③ 実験データと Shot Noise Data のしきい値 (一軸圧縮強度) よりも大きいセンサーの数は, 独立破壊領域の数 (n) が小さい時は, 両データともに Poisson 分布に適合した. (n) の数が大きい時は, 中心極限定理より正規分布で近似出来る. $n=10\sim 30000$ (構造物幅 100 m と氷厚 2 m の場合は ($n=28572$)) の範囲の最大接触率 (=最大接触面積/貫入面積) を計算し, 貫入面積が大きくなると最大接触数 (率) は大幅に減少することを示した.

④ 上記の確率分布を用いて, 貫入面積の増大に伴い貫入氷圧力の極値が減少することを, 氷盤と構造物の接触率に注目し非同時的破壊の概念に基づき示した.

⑤ 以上の全氷力の計算結果と現地観測結果 (Sanderson, 1988) を比較し, 今後は氷厚変化の効果・氷盤強度の体積効果・氷盤強度の位置効果を調べ, 更に貫入氷圧力と貫入面積の関係を検討する必要性を指摘した.

参 考 文 献

Ashby, M. F., A. C. Palmer, M. Thouless, D. J. Goodman, M. W. Howard, S. D. Hallam, S. A. F. Murrell, T. J. O. Sanderson and A. R. S. Ponter (1986): Nonsimultaneous failure and ice loads on arctic structure, Proc. OTC, pp. 399-404.
Cox, G. F. N., J. A. Richter-Menge, W. F. Weeks, M. Mellor and H. Bosworth (1984): Mechanical properties of multi-year sea ice, Phase I: Test Results, CRREL REPORT 84-9.
Kry, P. R. (1978): A statistical prediction of effective ice crushing stresses on wide structures, Proc. IAHR, part 1, pp. 33-47.
Sanderson, T. J. O. (1988): ICE MECHANICS-risks to

- offshore structures, Graham & Trotman, pp. 1-253.
- Takeuchi, T., T. Terashima, H. Saeki, S. Okamoto and T. Yamashita (1992a): Nonsimultaneous failure and local pressure of ice in ice/vertical structure interaction, Proc. ITC, M. I. T., Cambridge., pp. 135-146.
- 竹内貴弘・佐伯 浩・岡本 智・山下俊彦 (1992b): 大断面直立海洋構造物に作用する氷力に関する研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻 (2), pp. 766-770.
- Takeuchi, T., K. Enoki, S. Okamoto and H. Saeki (1993): On the characteristics of uniaxial compressive strength and elastic modulus of natural sea ice, Proc. ISOPE-93 (to appear).
- Weiss, G. (1977): Shot noise models for the generation of synthetic streamflow data, Water Resources Research, Vol. 13, No. 1, pp. 101-108.
-